

HOCHFREQUENZTECHNISCHE UNTER-  
SUCHUNGEN ZUM BAU EINES  
WENDELLINEARBESCHLEUNIGERS

Friedrich Saure

1966



Hochfrequenztechnische Untersuchungen  
zum Bau eines Wendellinearbeschleunigers

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Johann-Wolfgang-Goethe-Universität  
zu Frankfurt am Main

Vorgelegt von  
Friedrich Saure  
aus Frankfurt am Main  
1966

Mit Genehmigung der Fakultät zum Druck gekürzt.  
Ein Exemplar der ungekürzten Arbeit liegt in der  
Senckenbergischen Bibliothek der Universität vor



Dekan: Prof. Dr. Herbert Staude

1. Gutachter: Prof. Dr. Hermann Dänzer

2. Gutachter: Prof. Dr. Erwin Schopper

Tag der mündlichen Prüfung: 12. 7. 1966

Tag der Promotion: 12. 7. 1966

## 1. Einleitung.

Die vorliegende Arbeit berichtet über einen Wendellinearbeschleuniger für Protonen im Energiebereich von 0,15 bis 1 MeV, der zur Zeit am Institut errichtet wird. Dieser Beschleuniger soll in erster Linie dem weiteren Studium der Eigenschaften dieses Linearbeschleunigertyps und der Untersuchung von Fokussierungsproblemen dienen (L 3, L 9, L 15).

Die Beschleunigung von Protonen in dem hier in Betracht gezogenen kleinen Energiebereich erscheint heute kernphysikalisch wenig ergiebig. Bedenkt man aber, daß das hier untersuchte Wendelmodell auch zur Beschleunigung schwerer Ionen geeignet ist, so dürfte die vorliegende Arbeit im Hinblick auf diese kernphysikalisch sehr viel bedeutungsvollere Anwendung von einigem Interesse sein.

Im folgenden werden hochfrequenztechnische Messungen an Prototypen der Beschleunigungssektionen mitgeteilt, die zur Festlegung der geometrischen Daten des Beschleunigungssystems, zur Bestimmung der erforderlichen Senderleistung und zur Wahl der optimalen Betriebsfrequenz notwendig waren.

Zur vollständigen experimentellen Bestimmung der hochfrequenztechnischen Eigenschaften des Beschleunigungssystems fehlte es bisher an einem hinreichend genauen für den Wendellinearbeschleuniger geeigneten direkten Meßverfahren der beschleunigenden elektrischen Feldstärke. Nachdem die bisher bei anderen Linearbeschleunigern benutzten Meßverfahren unbefriedigende Resultate ergaben, wurde hier ein Meßverfahren der beschleunigenden elektrischen Feldstärke entwickelt, das auf einem besonders konstruierten Elektrometermeßwerk beruht, einem sogenannten "Ellipsoid-Voltmeter". Obwohl dieses Meßverfahren im Prinzip schon seit langem bekannt ist, sind damit überraschenderweise offenbar noch keine Feldstärkemessungen an Teilchenbeschleunigern ausgeführt worden.

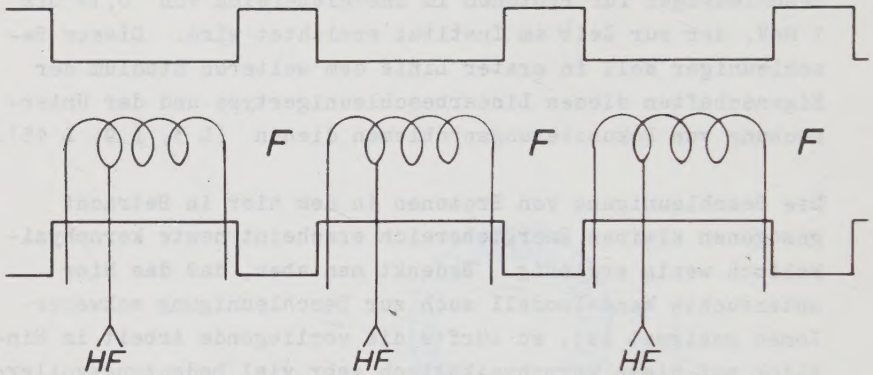


Abb. 1: Sektionsweiser Aufbau des Wendellinearbeschleunigers.

Zum Vergleich mit den Meßergebnissen werden die von JOHNSEN (L 2) auf der Grundlage des "Schichtmodells" angestellten Rechnungen herangezogen.

## 2. Gesichtspunkte zur Dimensionierung des Beschleunigungssystems.

Der Beschleuniger wird sich, wie die obenstehende Abbildung schematisch zeigt, aus vier 1,20 m langen Beschleunigungssektionen zusammensetzen, die jeweils ein Energieintervall von 212,5 keV überbrücken. Zwischen den Sektionen befinden sich kurze Fokussierungseinheiten.

Die geometrischen Parameter des Beschleunigungssystems unterliegen der Bedingung, daß die Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle in axialer Richtung längs der gesamten Beschleunigungsstrecke der Geschwindigkeit des Sollteilchens

entspricht. Diese Anpassung der Phasengeschwindigkeit an die Teilchengeschwindigkeit kann beim Wendellinearbeschleuniger sowohl durch eine Variation des Wendelradius  $a$  als auch durch eine Variation der Wendelsteigung  $s$  erzielt werden. Wir sprechen daher in diesem Zusammenhang vom sogenannten Wicklungsproblem.

Einen weiteren Gesichtspunkt bei der Dimensionierung des Beschleunigungssystems und bei der Wahl der Betriebsfrequenz  $f$  bildet die Forderung, die beschleunigende elektrische Feldstärke auf der Wendelachse mit einer minimalen vom Sender dem Beschleuniger zugeführten Hochfrequenzleistung zu erzielen. Wie eine eingehendere Betrachtung zeigt, ist es zweckmäßig, den Wendelradius möglichst eng und den Außenleiterradius möglichst groß zu wählen.

Zur näheren Beschreibung des Wendellinearbeschleunigers ist es üblich, unter den Bezeichnungen "Reihenimpedanz"  $\xi$  und "Parallelimpedanz"  $\eta$  zwei für den Wellenleiter charakteristische Größen einzuführen, die durch

$$\xi = \frac{E^2}{S} \quad \text{und} \quad \eta = \frac{E^2}{P}$$

definiert werden.  $E$  bezeichnet die Amplitude der beschleunigenden elektrischen Feldstärke auf der Wendelachse,  $S$  den Leistungsfluß der vorwärts laufenden elektromagnetischen Welle und  $p$  die Verlustleistung, bezogen auf die Längeneinheit in axialer Richtung. Zwischen den beiden Größen besteht ein aus den Definitionen leicht ableitbarer Zusammenhang mit der Dämpfungslänge  $l_0$  des elektromagnetischen Leistungsflusses im Wellenleiter:

$$\eta = \xi l_0.$$

Bei einem sektionsweisen Aufbau eines Wendellinearbeschleunigers gilt folgende Beziehung zwischen der insgesamt vom Sender dem Beschleuniger zugeführten Hochfrequenzleistung  $N$ , dem Wendelradius  $a$ , dem Außenleiterradius  $b$ , der Betriebsfrequenz  $f$  sowie der kinetischen Energie des Sollteilchens  $T$ :

$$N(a_1, \dots, a_n, b, f) = \frac{2}{L} \frac{1}{(e \cdot \cos \varphi)^2} \sum_{i=1}^n \left( \int_{\Theta_i}^{\Theta_i} \frac{dT}{\sqrt{\xi(T, a_i, b, f)}} \cdot \int_{\Theta_i}^{\Theta_i} \frac{dT}{\sqrt{\xi(T, a_i, b, f)} \cdot l_0(T, a_i, b, f)} \right).$$

$i$  ist ein Index, der die einzelnen Beschleunigungssektionen kennzeichnet;  $n$  bedeutet die Anzahl der Beschleunigungssektionen.  $e$  und  $\varphi$  sind die Ladung und der Phasenwinkel des Sollteilchens gegenüber dem Maximum der Hochfrequenzwelle.  $\Theta_i$  und  $\Theta_i$  bezeichnen die Anfangs- und Endenergien der einzelnen Beschleunigungssektionen. Der Zahlenfaktor 2 der rechten Seite berücksichtigt den Betrieb des Beschleunigers mit stehenden Wellen: die rücklaufende Welle trägt im Mittel nicht zum Energiegewinn des Sollteilchens bei, verdoppelt aber die Verluste. Der Außenleiterradius  $b$  und die Betriebsfrequenz  $f$  sind bei dem hier betrachteten Beschleuniger bei allen Sektionen gleich.

Da bei der Konstruktion eines Wendellinearbeschleunigers eine genaue Kenntnis der Reihenimpedanz  $\xi$  und der Parallelimpedanz  $\eta$  in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern und von der Betriebsfrequenz erforderlich ist, bestand ein Anliegen der vorliegenden Arbeit darin, diese beiden Größen mit direkten Meßmethoden experimentell zu bestimmen.

### 3. Aufbau der Beschleunigungssektionen.

Nachdem die geometrischen Parameter des Beschleunigungssystems festgelegt worden waren, wurden insgesamt fünf Prototypen der Beschleunigungssektionen angefertigt. Diese Wendeln entsprachen jeweils bis auf eine längs der Wendelachse konstante Wendelsteigung  $s$  den vier Beschleunigungssektionen.

Bei der Konstruktion der Beschleunigungssektionen bestanden die Schwierigkeiten vor allem in der mechanischen Befestigung der Wendeln in den Außenleitern. Das dielektrische Stützmaterial muß einerseits den in Verbindung mit starken Hochfrequenzfeldern auftretenden Temperaturen gewachsen sein und einen möglichst geringen Einfluß auf die elektrische Verlustleistung besitzen, andererseits aber eine hinreichende mechanische Präzision gewährleisten. Nach einigen Versuchen erwies sich eine Konstruktion als zweckmäßig, bei der die Wendeln an radial gespannten Quarzfäden aufgehängt war.

#### 4. Meßmethoden.

An den Beschleunigungssektionen wurden die Phasengeschwindigkeit  $v_p$  der elektromagnetischen Welle in axialer Richtung, die Reihenimpedanz  $\xi$  und die Parallelimpedanz  $\eta$  mit direkten Meßmethoden bestimmt.

Von den drei dazu erforderlichen Meßverfahren waren zwei (die Meßmethoden der Phasengeschwindigkeit  $v_p$  und der Dämpfungslänge  $l_0$ ) bereits bekannt und konnten mit geringen Abwandlungen übernommen werden. Hingegen bereitete es Schwierigkeiten, die beschleunigende elektrische Feldstärke auf der Wendelachse mit den bisher bei anderen Linearbeschleunigern angewandten Meßmethoden (L 6, L 7) hinreichend genau zu bestimmen.

Es wurde deshalb hier eine neue direkte Meßmethode der beschleunigenden elektrischen Feldstärke eines Wendellinearbeschleunigers entwickelt, die auf einem besonders konstruierten Elektrometermeßwerk beruht. Es handelte sich um ein sogenanntes Ellipsoid-Voltmeter.

Das Meßwerk, dessen Aufbau schematisch in der Abbildung 2 dargestellt ist, besteht aus einem etwa 1 cm langen metal-

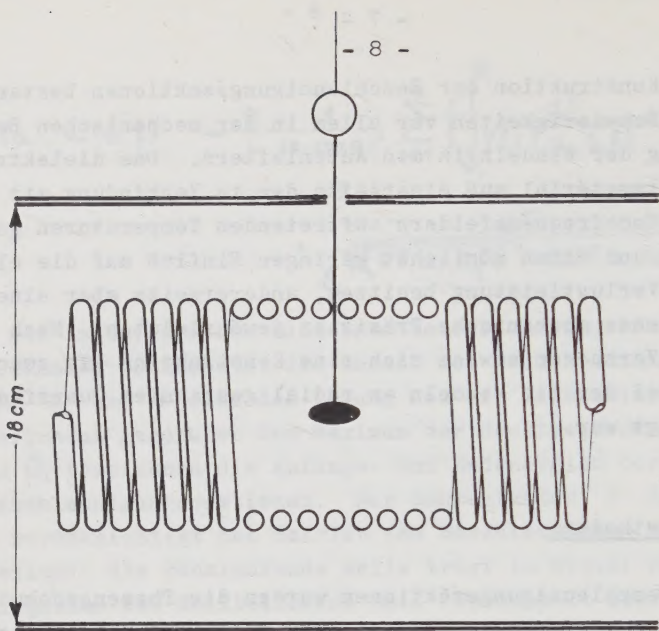


Abb. 2: Schematische Darstellung der Meßanordnung zur direkten Bestimmung der beschleunigenden elektrischen Feldstärke auf der Wendelachse mit einem Ellipsoid-Voltmeter.

lischen Rotationsellipsoid, das an einem dünnen Quarzfaden aufgehängt war und ähnlich wie eine Kompaßnadel Schwingungen um die Feldrichtung ausführte.

Bei einem metallischen Rotationsellipsoid besitzt nicht nur das elektrische, sondern auch das auf der Wendelachse vorhandene magnetische Hochfrequenzfeld einen Beitrag zur Direktionskraft. Der magnetische Beitrag, der mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden konnte, lag unter den Betriebsbedingungen bei der hier gewählten Anordnung in der Nähe von 15 %. Der Meßbereich erstreckte sich auf Feldstärken der Größenordnung von 200 V/cm mit einem Meßfehler von etwa 1,5 %.

Wenn während der Feldstärkemessung gleichzeitig die der Beschleunigungssektion zugeführte Hochfrequenzleistung bestimmt

wurde, so konnte daraus über den Leistungsfluß  $S$  und über die Verlustleistung  $P$  die Parallelimpedanz  $\eta$  und die Reihenimpedanz  $\xi$  unmittelbar nach ihren Definitionen berechnet werden.

## 5. Meßergebnisse.

Bei der Phasengeschwindigkeit  $v_p$  der elektromagnetischen Welle in axialer Richtung zeigte ein Vergleich zwischen den Meßwerten und den Rechenwerten nach JOHNSEN (L 2) eine gute Übereinstimmung. Die beiden Kurven schneiden sich bei den einzelnen Beschleunigungssektionen jeweils unter einem sehr spitzen Winkel in einem Punkt, der glücklicherweise in der Nähe der optimalen Betriebsfrequenz liegt.

In Abb. 3, S.10, sind als Beispiel die Meß- und Rechenwerte der Reihenimpedanz  $\xi$  und der Parallelimpedanz  $\eta$  der zweiten Beschleunigungssektion in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz aufgetragen. Bei der Reihenimpedanz  $\xi$  ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen der schichtmodellmäßigen Rechnung und den Experimenten zu beobachten. Erst bei höheren Frequenzen, wo die Feldlinien mehr und mehr in der Nähe der Wendeldrähte verlaufen, sind die idealisierenden Annahmen des Schichtmodells offenbar nicht mehr ganz erfüllt.

Die Parallelimpedanz  $\eta$  wird dagegen durch die Rechnung nicht sehr genau beschrieben. Die Meßkurve erreicht zwar annähernd die Höhe des Maximums der Rechenkurve, die Lage des Maximums ist aber zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Dies bedeutet, daß der Leistungsbedarf des Beschleunigers zwar annähernd richtig beschrieben werden kann, daß aber die optimale Betriebsfrequenz des Beschleunigers niedriger liegt als der Rechenwert. Diese Abweichungen beruhen auf der im Rahmen einer schichtmodellmäßigen Rechnung stark vereinfachten Berechnung der elektrischen Dämpfung.

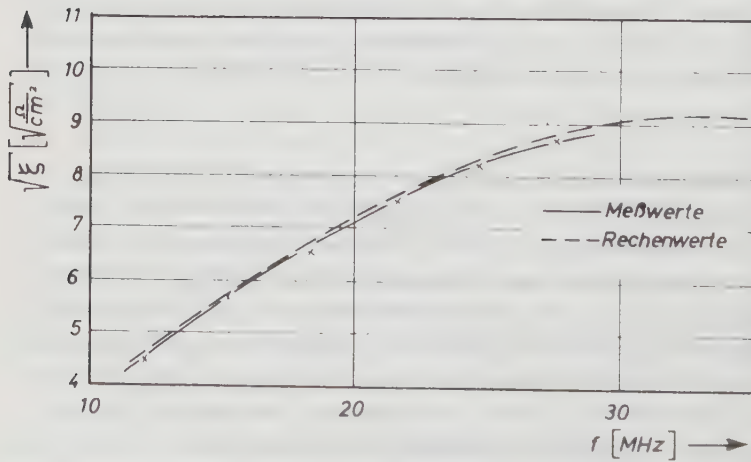
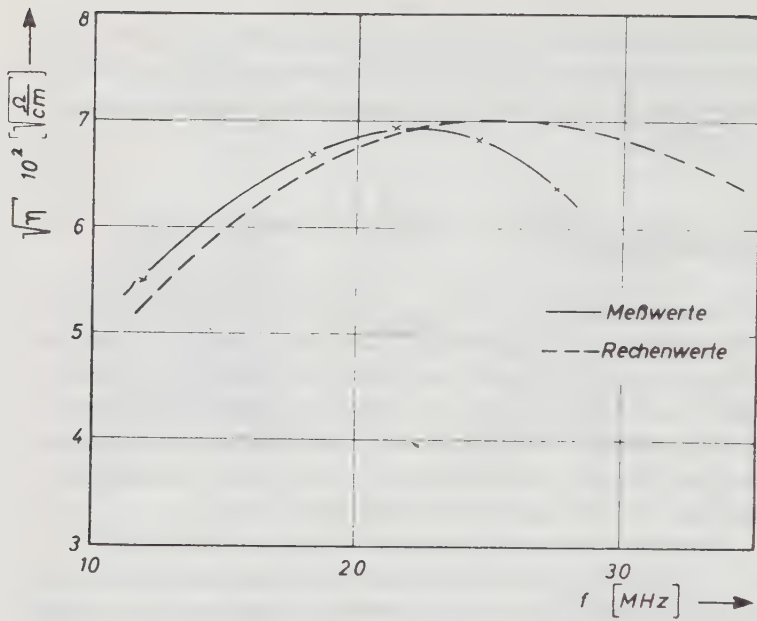


Abb. 3: Die Parallelimpedanz  $\eta$  und die Reihenimpedanz  $\xi$  einer Wendel mit dem Wendelradius  $a = 4,52$  cm, dem Außenleiter-radius  $b = 9$  cm, dem Wendeldrahtdurchmesser  $d = 0,3$  cm und der Wendelsteigung  $s = 0,605$  cm.

Ein zusammenfassender Vergleich zwischen den Meßergebnissen und den Rechenwerten nach (L 2) ist in der Tabelle der folgenden Seite zusammengestellt. Dabei zeigt sich, daß sich die in Zusammenhang mit Parallelimpedanz  $\eta$  beobachteten Fehler bei der Berechnung der insgesamt erforderlichen Senderleistung weitgehend kompensieren. Die optimale Betriebsfrequenz des Beschleunigers liegt dagegen mit 25 MHz niedriger als der Rechenwert von etwas über 30 MHz.

Berechnet man die mittlere Parallelimpedanz  $\bar{\eta}$  des Beschleunigers, so ergibt sich unter Berücksichtigung des Stehwellenbetriebs ein Wert von  $0,21 \cdot 10^6$  Ohm/cm. Dieses Ergebnis zeigt, daß der Wendellinearbeschleuniger vom Verhältnis zwischen zugeführter Senderleistung und beschleunigender elektrischer Feldstärke her durchaus mit anderen Linearbeschleunigertypen vergleichbar ist.

|        | T (keV)            | $W_1$                        | $W_2$                        | $W_3$                        | $W_4$                        | $\Sigma N_i$ (kW) |
|--------|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
|        |                    | 150 - 362,5                  | 362,5 - 575                  | 575 - 787,5                  | 787,5 - 1000                 |                   |
| 15 MHz | $N_i$ (kW)         | 2,3                          | 2,8                          | 3,6                          | 4,3                          | 12,9              |
|        | $N_i$ (Rechnung)   | (2,3)                        | (3,4)                        | (3,7)                        | (4,8)                        | (14,2)            |
|        | $\frac{s}{D}$ (cm) | 0,408 - 0,596<br>1,36 - 1,97 | 0,596 - 0,753<br>1,97 - 2,51 | 0,600 - 0,697<br>1,50 - 1,74 | 0,697 - 0,782<br>1,74 - 1,94 |                   |
| 20 MHz | $N_i$ (kW)         | 2,2                          | 2,1                          | 2,7                          | 3,0                          | 10,0              |
|        | $N_i$ (Rechnung)   | (2,0)                        | (2,6)                        | (2,7)                        | (3,4)                        | (10,7)            |
|        | $\frac{s}{D}$ (cm) | 0,426 - 0,624<br>1,42 - 2,08 | 0,624 - 0,771<br>2,08 - 2,57 | 0,612 - 0,708<br>1,53 - 1,77 | 0,708 - 0,792<br>1,77 - 1,98 |                   |
| 25 MHz | $N_i$ (kW)         | 2,8                          | 2,2                          | 2,4                          | 2,5                          | 9,8               |
|        | $N_i$ (Rechnung)   | (2,0)                        | (2,3)                        | (2,2)                        | (2,7)                        | (9,3)             |
|        | $\frac{s}{D}$ (cm) | 0,442 - 0,640<br>1,47 - 2,13 | 0,640 - 0,783<br>2,13 - 2,61 | 0,627 - 0,721<br>1,57 - 1,80 | 0,721 - 0,804<br>1,80 - 2,01 |                   |

Tab. 3: Die Hochfrequenzleistung  $N_i$  der einzelnen Beschleunigungssektionen und die Variation der Wendelsteigung  $s$  eines aus den Wendeln  $W_1$  bis  $W_4$  zusammengesetzten Beschleunigers im Betrieb mit stehenden Wellen bei einem Phasenwinkel  $= 30^\circ$  und einer Sektionslänge  $L = 1,20$  m. Der Außenleiterradius beträgt bei allen Sektionen  $b = 9$  cm, die Wendelnradien besitzen die Werte  $a_1 = a_2 = 4,52$  cm und  $a_3 = a_4 = 3,85$  cm.

## 6. Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit berichtet von hochfrequenztechnischen Messungen an Versuchswendeln, die den Beschleunigungssektionen eines im Bau befindlichen Wendellinearbeschleunigers für Protonen zwischen 0,15 und 1 MeV entsprechen. Die Messungen dienten einer Prüfung der Berechnungsmethoden und lieferten Konstruktionsunterlagen.

Es wurde eine Meßmethode entwickelt, mit der die beschleunigende elektrische Feldstärke eines Wendellinearbeschleunigers erstmals direkt mit guter Genauigkeit gemessen werden konnte. Dazu diente ein besonders konstruiertes Elektrometer, ein sogenanntes "Ellipsoid-Voltmeter". Der Meßfehler lag bei 1,5%; nach den gewonnenen Erfahrungen wird sich aber die Genauigkeit noch steigern lassen.

Obwohl das Ellipsoid-Voltmeter-Verfahren schon seit langem bekannt ist, wurden damit anscheinend noch keine Feldstärkemessungen an Linearbeschleunigern ausgeführt. Es zeigte sich, daß dieses Meßverfahren auch für dieses Anwendungsgebiet und besonders für den Wendellinearbeschleuniger gut geeignet ist.

Die Messungen ergaben, daß die schichtmodellmäßige Berechnung des Wendellinearbeschleunigers nach JOHNSEN (I 2) unter den geometrischen Verhältnissen des hier betrachteten Beschleunigers stets gute Ergebnisse der Phasengeschwindigkeit liefert. Bei der Parallelimpedanz können dagegen Abweichungen auftreten, so daß die optimale Betriebsfrequenz des Beschleunigers niedriger als der theoretische Wert liegt.

Die Experimente bestätigen die Voraussage der Theorie über den Leistungsbedarf des Beschleunigers, der bei einer Beschleunigungsstrecke von 4,80 m etwa 10 kW beträgt. Der Wendellinearbeschleuniger ist also auch bei verhältnismäßig niedrigen Protonenenergien hinsichtlich des Verhältnisses zwischen der zugeführten Hochfrequenzleistung und der beschleunigenden elektrischen Feldstärke mit anderen Linearbeschleunigertypen vergleichbar.

Herrn Dr. H. Klein danke ich für anregende Diskussionen, Frl. Endres für ihre Hilfe bei der Ausführung der Messungen.

Zu ganz besonderem Dank bin ich meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. H. Dänzer, verpflichtet, der diese Arbeit anregte und durch zahlreiche überaus wertvolle Ratschläge förderte.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s .

1. W. WALKINSHAW und K. WYLLIE, Math.Memo. 57.(1948)
2. K. JOHNSEN, Theoretical Losses in a Helix with Shield an Support, Cern - PS/KJ 27 (1954).
3. W. MÜLLER und J. REMBSER, Überlegungen zum Bau eines Wendellinearbeschleunigers für Protonen, Nucl. Instr. 4, S.202 (1959).
4. J.R. PIERCE, Travelling Wave Tubes, Van Nostrand (1959).
5. F.M. BRUCE, The Design of an Ellipsoid-Voltmeter for the Precision Measurement of High Alternating Voltages, Journal I.E.E. 94, S.129 (1947)
6. J.F. STEINHAUS, "Glo-Ball" Development, Rev. Scient. Instr. 27, S.575 (1957).
7. S.W. KITCHEN and A.D. SCHELBERG, Resonant Cavity Field Measurement, Journal o.Appl.Phys. 26, S.619 (1955).
8. L.C. MAIER, Jr., and J.C. SLATER, Determination of Field Strength in a Linear Accelerator Cavity, Journal o.Appl.Phys. 23, S.78 (1952).
9. H. KLEIN, Ein mit Elektronen betriebener Wendellinearbeschleuniger als Modell eines Protonenbeschleunigers, Zeitschr.f.angew.Physik 18, 3 (1964)
10. F. OLLENDORF, Die Grundlagen der Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag, Berlin 1926.
11. K. JOHNSEN, On the Theorie of Linear Accelerators, Chr. Michelsons Inst. Beret.16 (1954)
12. S. SENSIPER, Electromagnetic Wave Propagation on Helical Structures, Proc. I.R.E. 43, S.149 (1955).
13. G SCHIEFER, Die Eigendämpfung von Drahtwendelleitungen, AEÜ, 11, S.35 (1957).
14. BECKER - SAUTER, Theorie der Elektrizität, Teubner, Bd.1, S.91 (1962).
15. H. HERMINGHAUS, Eine Erweiterung der Leitungstheorie auf den Wellenleiter eines Wendellinearbeschleunigers, Dissertation Frankfurt (1961)
16. S.P. MORGAN, Jr., Effect of Surface Roughness on Eddy Current Losses at Microwave Frequencies, Journal of Applied Physics 20, 352 (1949).
17. F.SAURE, Über die hochfrequenztechnischen Eigenschaften eines Wendellinearbeschleunigers für Protonen im Energiebereich von 0,15 bis 1 MeV Zeitschr.f.Ang.Phys. 18, 3, S.150 (1964)

## Lebenslauf.

Am 11.9.1933 wurde ich, Friedrich Saure, als Sohn des späteren Universitätsprofessors Dr.iur. Wilhelm Saure und seiner Ehefrau Charlotte, geb.Roßberg, in Berlin geboren.

Nach der Deutschen Volksschule in Prag besuchte ich die Hermann-Lietz-Schulen Buchenau und Bieberstein. Später trat ich in das Ziehen-Realgymnasium in Frankfurt am Main ein, an dem ich im Jahre 1953 das Abitur bestand. Anschließend begann ich das Studium der Physik an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt, wo ich im Jahre 1957 die Diplom-Vorprüfung, im Jahre 1961 die Diplom-Hauptprüfung ablegte. Meine Diplomarbeit mit dem Thema "Ein Prüfverfahren von Magnetkernen im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei einem Luftspulenbetatron" fertigte ich im Institut für angewandte Physik unter der Leitung von Herrn Professor Dr. H. Dänzer an.

Nachdem ich zunächst eine Hilfsassistentenstelle innehatte, wurde ich im März 1962 mit der Verwaltung einer wissenschaftlichen Assistentenstelle betraut. Gleichzeitig begann ich - wieder unter Leitung von Herrn Professor Dr. H. Dänzer - mit den Arbeiten an der vorliegenden Dissertation.





